

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství



TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN

MACHINING TECHNOLOGY OF MAGNESIUM ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE:

AUTHOR

MARTIN NEZGODA

VEDOUCÍ PRÁCE:

SUPERVISOR

Ing. RADIM TROJAN, Ph.D.

OSTRAVA 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálů a technologií pro automobily

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Nezgoda**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl
Téma: **Technologie obrábění hořčíkových slitin**
Machining technology of magnesium alloys

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky hořčíkových slitin
2. Hořčíkové slitiny vhodné pro obrábění
3. Volba nástroje a řezných podmínek pro frézování hořčíkových slitin
4. Návrh a optimalizace řezných podmínek

Seznam doporučené odborné literatury:

ŘASA, J., GABRIEL, V. Strojírenská technologie 3 – Metody, stroje a nástroje pro obrábění, 1.díl. 2.vyd. PRAHA: Scientia, spol. s r. o., 2005. 256 s. ISBN 80-7183-337-1.

VLACH, B., aj. Technologie obrábění a montáží. 1. vyd. Praha: SNTL- Nakladatelství, technické literatury, 1990. 464 s. ISBN 80-03-00143-9.

Produktivní obrábění kovů. Sandviken: Sandvik Coromant, c1997, 300 s.

KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích. Vyd. 1. Praha: Scientia, 1996, 212 s. ISBN 80-7183-024-0.

Sborník příspěvků odborného diskuzního fóra Hi-tech metody v obrábění a jeho požadavky na absolventa: [Horní Bečva, 6.-7.12.2012]. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012, 22 s. ISBN 978-80-248-2878-7.

DRÁPALA, Jaromír, Lumír KUCHAR, Karel TOMÁŠEK a Zuzanka TROJANOVÁ. Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík-příměs. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004, 172 s. ISBN 80-248-0579-0.

FRIEDRICH, Horst E a Barry L MORDIKE. Magnesium technology: metallurgy, design data, applications. Berlin: Springer, c2006, xxii, 677 s. ISBN 3-540-20599-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radim Trojan, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání. BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání BP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část BP bude zpracována v rozsahu min. 15 stran a celkový rozsah BP bude min. 25 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku.

Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslvány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

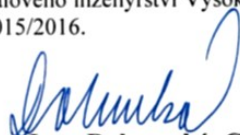
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě dne

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá obráběním hořčíkových slitin. Práce popisuje hořčík obecně. Práce se zabývá technologií obrábění hořčíkových slitin a nebezpečí, které při obrábění těchto slitin vznikají. Popisuje materiály na bázi hořčíku, které se nejvíce využívají k samotnému obrábění a lití. V práci jsem na konkrétní strojírenské součásti, úchytu tlumiče navrhnul podmínky pro obrábění tohoto dílu z hořčíkových slitin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technologie frézování, hořčík, výroba, mechanické vlastnosti, tepelné zpracování, hořčíkové slitiny

ABSTRACT

This thesis deals with the machining of magnesium alloys. The thesis describes the magnesium in general. The work deals with technology machining magnesium alloys and dangers when machining these alloys are formed. It describes materials that are most used to the actual machining and casting. At work I have on specific engineering components, mount dampers suggested conditions for machining of parts from magnesium alloys.

KEYWORDS

Milling technology, magnesium, manufacture, mechanical properties, heat treatment, a magnesium alloy

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Radimu Trojanovi, Ph.D. za poskytnutí materiálů a pomoc při všech částech mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod.....	2
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY HOŘČÍKOVÝCH SLITIN.....	3
1.1 VÝROBA	4
1.1.1 Vlastnosti čistého hořčíku.....	4
1.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI	5
1.3 PŘÍSADOVÉ PRVKY	6
1.4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	7
2 HOŘČÍKOVÉ SLITINY VHODNÉ PRO OBRÁBĚNÍ	9
2.1.1 Slitina AZ91.....	9
2.1.2 Slitina AZ31.....	9
3 VOLBA NÁSTROJE A ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO FRÉZOVÁNÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN	11
3.1 BEZPEČNOSTNÍ OPATŘENÍ	13
4 FRÉZOVÁNÍ	13
4.1 FRÉZA.....	14
4.1.1 Zuby frézy	15
4.1.2 Tvorba třísek.....	17
4.2 FRÉZY VHODNÉ PRO OBRÁBĚNÍ HOŘČÍKU	18
4.2.1 Frézy z rychlořezné oceli	18
4.2.2 Frézy s karbidovými destičkami.....	19
4.2.2.1 Povlakování karbidových destiček	19
4.2.2.1.1 První generace povlakování.....	19
4.2.2.1.2 Druhá generace povlakování	19
4.2.2.1.3 Třetí generace povlakování	20
4.2.2.1.4 Čtvrtá generace povlakování	21
4.2.2.1.5 Materiály povlaků	21
4.2.2.1.6 Diamantové povlakování vrstvou PVD a CVD	22
4.2.3 Frézy s keramickými destičkami	23
4.2.4 Monolitní frézy povlakované diamantem.....	23
5 NÁVRH A OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK	24
6 ZÁVĚR	28
POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE.....	29

Úvod

Hořčíkové slitiny jsou materiály, které své první uplatnění našly za 2 světové války. Díky své nízké hmotnosti a dobrým vlastnostem se začaly hořčíkové slitiny využívat především v dopravním průmyslu. Největší využití zaznamenaly hlavně v letectví, kde je snaha o co nejlehčí konstrukce, proto se také začaly ze slitin hořčíku vyrábět bloky leteckých motorů.

V automobilovém průmyslu se převážně využívá k výrobě litých kol, kde největší využití zaznamenal u závodních speciálů. Ovšem v současné době se používá i u sériových vozidel, například pro výrobu karosérií, řízení, součástí pohonu a přenosu sil.

Cílem práce bylo popsat technologie obrábění hořčíkových slitin, popis hořčíkových slitin vhodných pro obrábění, dále popsat nástroje, které se k obrábění hořčíkových slitin používají a jaké řezné rychlosti a velikosti posuvů se u jednotlivých druhů nástrojů využívají.

Následující část se zabývá návrhem metodiky experimentu, kdy by se nahrazoval doposud používaný hliníkový materiál, materiálem z hořčíkových slitin. Jsou zde popsány řezné podmínky, chladicí kapalina, která by se musela vyměnit a nástroje, které by se k experimentu použili.

1 Úvod do problematiky hořčíkových slitin

Hořčík byl oficiálně poprvé objevený v roce 1808 a to ve formě chloridu hořečnatého MgCl_2 jistým chemikem Sir Humhrey Davy. V chemické periodické tabulce prvků nalezneme hořčík pod značkou Mg což je latinsky Magnesium, je velice lehký, stříbrolesklý (viz Obr. 1), středně tvrdý, tažný kov. Hořčík je osmým nejčastěji se vyskytujícím prvkem na Zemi a, tudíž jeho zásoby jsou prakticky nevyčerpatelné, je také třetím nejvíce vyskytujícím se prvkem v mořské vodě a díky tomu jeho produkce činí okolo 900 000 tun ročně, ale jeho spotřeba neustále stoupá. Ačkoli hořčík disponuje skvělými dovednostmi, mezi jeho hlavní nedostatky, které mu zabraňují větší rozšíření, jsou nízká odolnost vůči creepu, velice malá odolnost proti opotřebení, vysoká reaktivita a také špatná korozní odolnost.[1] [2]



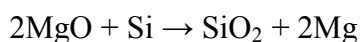
Obr. 1 Hořčíkový krystal [3]

1.1 Výroba

Výroba hořčíku termickým způsobem neboli karbothermický způsob, spočívá v redukci oxidu hořečnatého karbidem vápenatým nebo uhlíkem. Hořčíkové páry snadno reagují s kyslíkem a dusíkem, proto musí tato reakce probíhat buď v inertním plynu nebo ve vakuu.



Dalším takzvaným silikothermický způsob, je pomocí redukce oxidu hořečnatého křemíkem, tato metoda zaručuje vysokou čistotu, která se pohybuje okolo 98 – 99%. Tato reakce probíhá při normálním tlaku, jen při teplotách nad 2300°C.



Kovový hořčík se vyrábí většinou elektrolýzou roztavené směsi chloridu hořečnatého a chloridu draselného, který slouží jako přísada, která nám snižuje teplotu tání onoho chloridu hořečnatého. Chlorid hořečnatý získáváme u většiny případů z mořské vody, ale také tavením karnalitu, což je minerál s chemickým označením $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, tedy hexahydrát chloridu draselného – hořečnatého, nebo z koncentrovaných roztoků mořské soli takzvané solanky. Při elektrolýze se na železné katodě uvolňuje hořčík a na grafitové anodě chlor. Roztavený hořčík, který postupem času dojde na povrch taveniny, kde se sbírá děrovanými lžicemi.

1.1.1 Vlastnosti čistého hořčíku

Čistý hořčík za normální teploty reaguje s kyslíkem a vodou. Na suchém vzduchu se hořčík pokryje takzvanou oxidační vrstvou, která ho chrání před další oxidací, tomuto jevu se říká pasivace. S vodou za normální teploty reaguje hořčík poměrně velmi pomalu a to za vzniku hydroxidu hořečnatého. Při vysokých teplotách se hořčík velice dobře slučuje téměř se všemi prvky i s některými sloučeninami. Při vzplanutí hořčíku na vzduchu dochází k velmi oslnivé bílé záři. [4]

Krystalická mřížka	HCP
Atomové číslo	12
Atomová hmotnost	24,31
Měrná hmotnost	1,738 g.cm ⁻³
Teplota tání	650 °C
Teplota varu	1090 °C
Skupenské teplo tání	372 kJ.kg ⁻¹
Měrná tepelná kapacita při 20 °C	1,03 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Tepelná vodivost	155 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Součinitel stahování při tuhnutí	4,20%
Elektronegativita	1,31
Tvrdost	40 HB
Mez kluzu	69 - 105 MPa
Mez pevnosti	165 - 205 MPa
Tažnost	5 - 8 %
Modul pružnosti v tahu	16,3 GPa
Poissonovo číslo	0,35

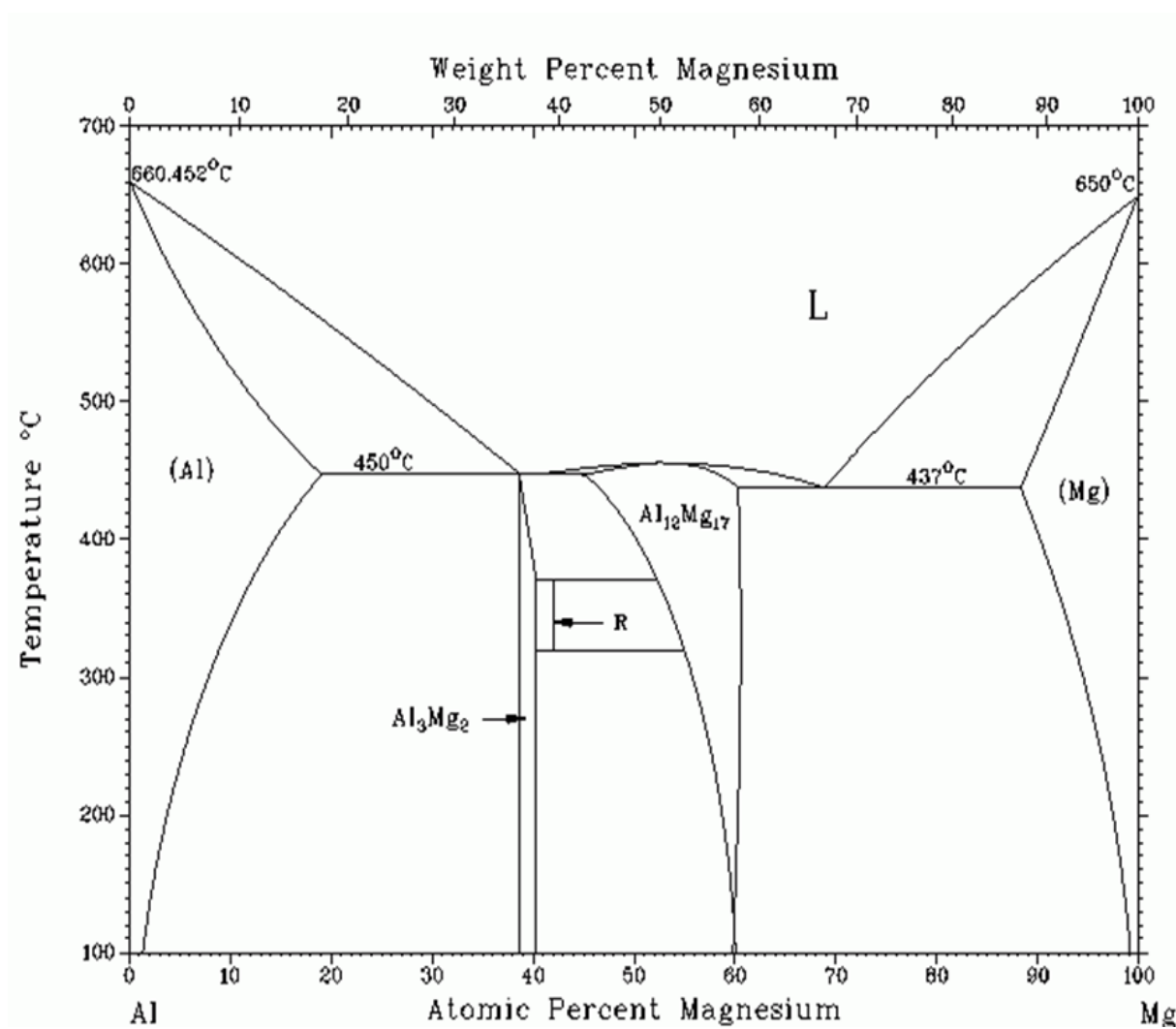
Tab. 1 Vlastnosti čistého hořčíku

1.1.2 Mechanické vlastnosti

Hořčík je kov bíle barvy a krystalizuje v šesterečné soustavě, o hustotě 1,74. 10³ kg/m³. Teplota tavení hořčíku je 650°C. Je poměrně málo pevný a špatně tvárný, protože má pouze jeden skluzový systém. Je tvárný až od teplot 225°C. Pro zlepšení jeho vlastností se mohou přidávat další prvky, zejména Al, Mn a Zn. Hliník zvyšuje pevnost, dále zlepšuje slévárenské vlastnosti a zmenšuje smrštivost při následném tuhnutí, mangan zlepšuje odolnost vůči korozi, Zinek zvyšuje pevnost a tvárnost těchto slitin. [5] [6]

1.2 Příkladové prvky

Přidáním jednotlivých přísadových prvků se dají zlepšit mechanické vlastnosti, při zachování předností hořčíku. Při volbě prvků se musíme ovšem řídit pravidly a ne každý prvek je vhodný. Atomový poloměr a druh krystalové mřížky jsou hlavními vlastnostmi, které ovlivňují fyzikální metalurgii slitin. Nejčastěji používaným přísadovým prvkem je hliník (3 až 9 hm%), přičemž jeho rozpustnost v hořčíku činí 12,7 hm% a to při eutektické teplotě 437°C, což je vidět i na binárním diagramu soustavy Al-Mg. [7] [8]



Obr. 2 Rovnovážný diagram soustavy Al-Mg [9]

Základní přísadové prvky jsou znázorněny na Obr. 3

Slitina		Střední obsah prvků v hm. %						$R_{p0,2}$	R_m	A_5
Báze	Označení	Al	Mn	Zn	KVZ	Zr	Cd	(Mpa)	(Mpa)	%
Slitiny hořčíku pro odlitky:										
Mg-Al-Zn	AZ63	6.0	0.33	2.5				115	255	6
Mg-Al-Zn	AZ91	9.6	0.3	0.9				140	260	1
Mg-Al-Zr	ZE61			6.0		0.9	0.5	95	280	4
Mg+KVZ	ZE23			2.0	Th 3.2	0.75			200	10
Slitiny hořčíku pro tváření:										
Mg-Al-Zn	AZ31	3.5	0.33	0.6				160	270	16
Mg-Zn-Zr	ZE61			5.8		0.6		300	340	10
Mg-Mn-Al	AM1 1	0.6	1.4		Ca 0.2			200	260	7
Mg-Li		0.75	0.25	2.25	Ce 0.25 Li 10.8			140	185	27

Obr. 3 Základní slitiny hořčíku a jejich přísadové prvky [10]

1.3 Tepelné zpracování

U hořčíkových slitin probíhají difuzní změny mnohem pomaleji, a proto musíme počítat s delšími časy výdrže na teplotě než například u hliníku. Ohřevy probíhají buď v taveninách solí, nebo v elektrických komorových pecích za využití ochranné atmosféry, která je složená ze směsi vzduchu s oxidem siřičitým. Zakázány jsou však kyanidy a dusičnany kvůli nebezpečí otravy, vznícení či výbuchu. Jednotlivé druhy tepelného zpracování jsou voleny podle požadavků na součást a chemického složení.[11]

Homogenizační žihání může vést ke zlepšení tvárných a pevnostních vlastností odlitků. Zároveň se využívá i k odstranění nerovnovážného rozdělení přísadových prvků v celém objemu slitiny po rekrystalizaci.

Žihání na odstranění vnitřního pnutí se provádí po tváření, kde je způsobeno vnitřní pnutí u odlitků, které je vyvoláno nestejně rychlým ochlazováním. Při tomto způsobu tepelného zpracování může dojít ke snížení mechanických vlastností slitiny.

Rekrystalizační žihání nemá pro hořčíkové slitiny velký význam, protože většina těchto slitin lze tvářet pouze za tepla. Rekrystalizační žihání se používá jen po tváření za studena a to při teplotách 250 – 350°C, neboť za vyšších teplot dochází ke zhrubnutí zrna a toto vede ke zhoršení mechanických vlastností.

Vytvrzování se skládá z rozpouštěcího ohřevu a následného umělého stárnutí. Tento proces se používá ovšem jen u slitin, které disponují dostatečným nárůstem pevnosti. Jinou alternativou může být i ochlazování odlitku ve vroucí vodě, nebo přímo na vzduchu. Mnohosložkové slitiny hořčíku a hliníku se vytvrzují za různých podmínek, které závisí převážně na typu slitiny.[11]

Slitiny Al-Cu-Mg (tvářené) se vytvrzují buď přirozeně nebo uměle. V obojích případech je stejné rozpouštěcí žihání při teplotách 495°C až 515°C a následném ochlazení do vody. Při přirozeném stárnutí je výdrž 96 až 140 h, přičemž na průběh stárnutí má velký vliv teplota, například při 0°C se inkubační doba prodlužuje o 10 h. Umělé stárnutí, se provádí za zvýšených teplot, které jsou 185 až 195 °C po dobu 6 až 12h s následným ochlazením na vzduchu. Pokud zpracováváme výrobky, které jsou plátované hliníkem je nutno pro zachování korozní odolnosti omezit difúzi mědi do hliníku u všech ohřívacích operací.

Slitiny Al-Mg-Li (tvářené), se vytvrzují pouze uměle za teplot okolo 450°C po dobu 1 h a následném ochlazení ve vodě. Pokud chceme dosáhnout maximální pevnosti, ohřev bude na teplotu 170°C a výdrž bude 8 až 24 h, nebo pokud chceme zlepšit plasticitu materiálu, ohřejeme na teplotu 120°C po dobu 12 až 48 h.

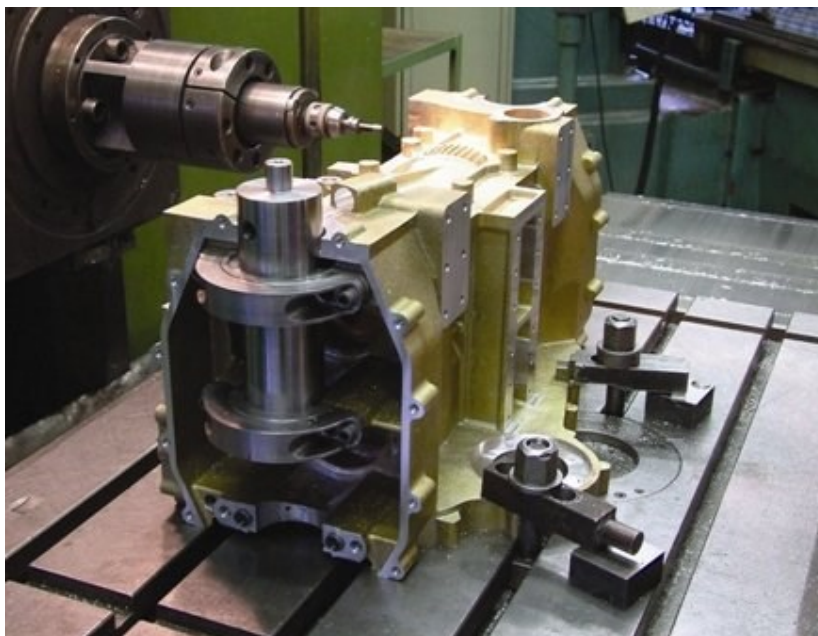
Slitiny hořčíku (Mg-Al-Zn a Mg-Zn-Zr) se na teplotu homogenizace v první etapě vytvrzování ohřívají stupňovitě, ovšem nad teplotou 250°C značně pomalu. Tyto slitiny se vyznačují výraznou heterogenitou, možností výskytu nerovnovážných eutektik mezi zrny. Během ohřevu se výrobky chrání proti oxidaci vakuem, atmosférou s SO₂ nebo solnou lázní. Homogenizační teploty bývají 380 až 425°C, přičemž doby prodlevy u tvářených slitin bývají 2 až 4 h a u odlitků jsou tyto prodlevy 8 až 32 h. [11] [12]

2 Hořčíkové slitiny vhodné pro obrábění

Čistý hořčík jako takový se ke konstrukčním účelům téměř nepoužívá, používá se ve vytvrzených slitinách. Je to způsobeno tím, že má velice malou pevnost a špatnou tvárnost za studena. Vlastnosti hořčíku ovšem můžeme zlepšit různými přísadovými prvky, jako jsou například hliník, zinek nebo mangan. Komerčně nejrozšířenějšími hořčíkovými slitinami pro slévárenské účely jsou slitiny typu Mg-Al, kde nejpoužívanější slitina je AZ91 a AZ31.[13]

2.1.1 Slitina AZ91

Tato slitina obsahuje 9,2 hm% hliníku, 0,7 hm% zinku a 0,2 hm% manganu. Mangan zlepšuje korozní odolnost a zinek, popřípadě kovy vzácných zemin výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti a zvyšují tak využitelnosti těchto slitin. Slitina AZ91 se vyznačuje velice dobrou korozní odolností. Napětí meze kluzu a maximální napětí klesají s rostoucí teplotou. Tuto slitinu je možné, používat pro lití do tenkostěnných, tvarově velmi komplikovaných odlitků. Tyto výhody ji předurčovaly k využití v automobilovém a leteckém průmyslu. Využívala se jako materiál pro velice přesné lití složitých součástek jako například části motoru Obr. 4 nebo koster radiových přijímačů, využívajících se v letectví. Hlavní nevýhodou této slitiny je ovšem vysoká hořlavost třísek, které vyvíjí velice vysokou teplotu až 2200°C. Ovšem je velice dobře obrobitelný a rozměrově stálý. [13]



Obr. 4 Opracování skříně leteckého motoru z Mg slitiny [13]

2.1.2 Slitina AZ31

Tato slitina obsahuje 2,5 až 3,5 hm% hliníku, 0,2 až 1 hm% manganu, 0,6 až 1,4 hm% zinku a nepatrné složky Cu, Si, Ni. AZ31 má velice dobrou třískovou obrobitelnost a má velice dobré plastické vlastnosti. Je také vhodná pro svařování a má dobré plastické vlastnosti. Ovšem tato slitina není vytvrditelná ve vlhkém prostředí a prostředím se značným obsahem soli je náchylná na korozi. Tato slitina se používá pro tvářené součásti ovšem bez tepelného zpracování. Výrobky zhotoveny z tohoto materiálu jsou vhodná pro nízká zatížení a teploty. [14]



Obr. 5 Výrobky ze slitiny AZ31 [15]

3 Volba nástroje a řezných podmínek pro frézování hořčíkových slitin

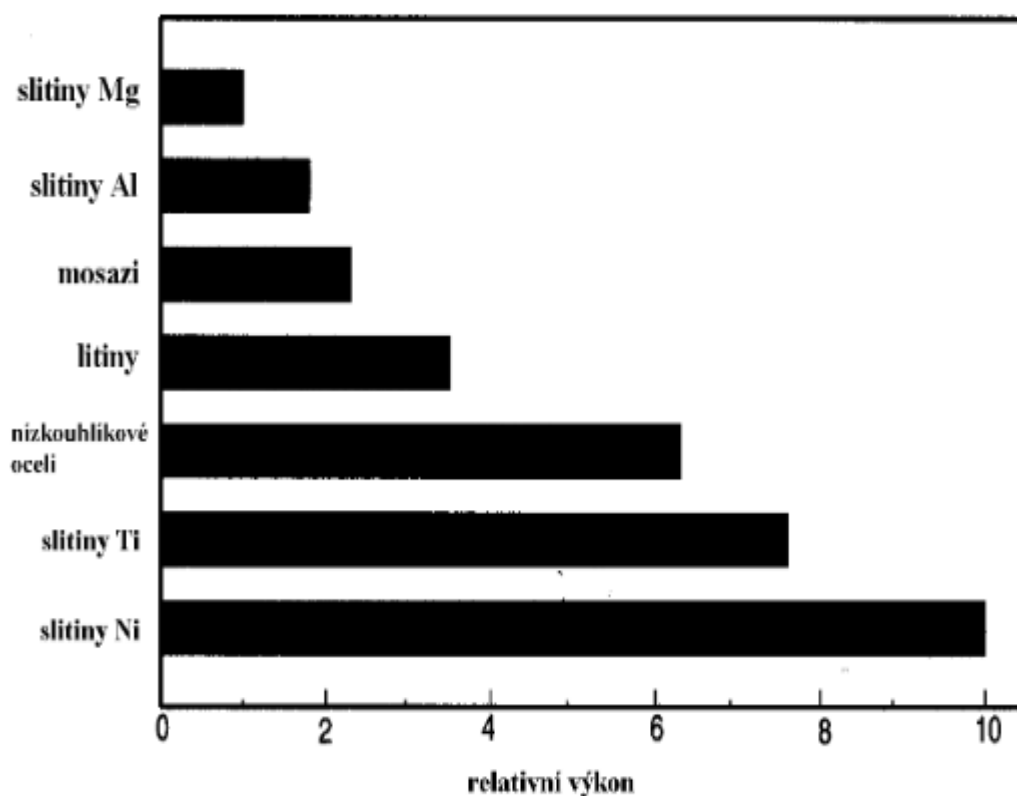
Obrábění je technologický proces, kterým vytváříme požadovaný tvar v určitých rozměrech a stupních přesnosti postupným ubíráním materiálu. Tímto se liší od jiných druhů technologií, například od dělení, odlévání či tváření materiálu. Jak je vidět na Obr. 6 při obrábění odlitku náboje kola z hořčíkových slitin se meze složitosti prakticky nekladou.



Obr. 6 Obrábění hořčíkového náboje kola [16]

Hořčíkové slitiny mají skvělou obrobiteľnost a používají se ty největší řezné rychlosti. Tyto rychlosti mohou dosahovat až 2500 m/min.

Řezné rychlosti jsou však ovlivněny spíše výkonností stroje nežli použitým nástrojem. Ve srovnání s ocelí a hliníkem můžeme u hořčíku provádět obrábění desetinásobnou rychlostí nežli u oceli a dvojnásobnou rychlostí než u maximální rychlosti obrábění hliníku, tohoto si můžeme všimnout na Obr. 7, který nám ukazuje graf výkonu potřebného pro obrábění jednotlivých druhů materiálů stejného objemu, při standardních řezných podmínkách. Hořčík má výbornou vlastnost a to sice tu, že rychle odvádí teplo z břitové destičky. Hořčík pohltí obrovské množství tepla, a proto jsou řezné rychlosti obrábění u hořčíku tak vysoké. Dokonce i samotná životnost nástroje se zvyšuje, oproti obrábění ocelí. Samotný hořčík se obrábí suchý, ovšem tento způsob zaručuje pouze přípustné, nikoliv špičkové kvality povrchu. Pokud se obrábí s chladicím médiem tak se používá chlazení petrolejem nebo olejem, který má vysoký bod vzplanutí. Nepřípustné je chlazení vodnými roztoky, vzhledem k velkému nebezpečí vzniku požáru. [17]



Obr. 7 Relativní výkon potřebný pro obrábění stejného objemu materiálu při standartních řezných podmínkách [18]

Pokud bychom se pokoušeli hořčík zapálit, museli bychom ho zahřát až téměř k teplotě přibližující se likvidu, která činí okolo 473°C a můžeme ji vidět na binárním diagramu Obr. 2, viz str. 6. Při rychlém obrábění hořčíku se většinou volí větší odlamování třísek, které snižují nebezpečí případného vznícení.

Velice obezřetně se musí také zacházet i s třískami, které musí být v suchu a bez případného přístupu vody. Tyto suché třísky se většinou vrací výrobcí, kde slouží jako vratný materiál pro nové odlévání hořčíkových slitin. [18]

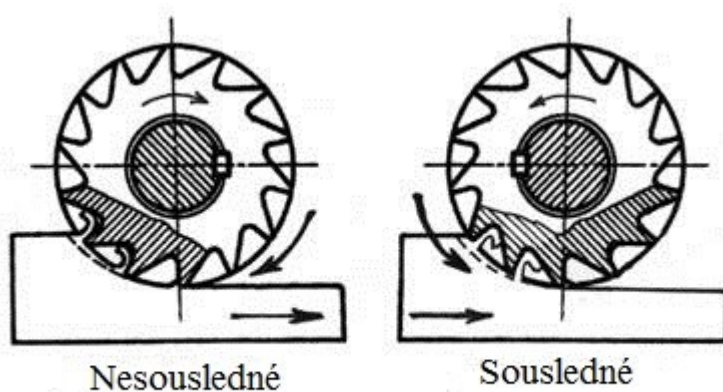
3.1 Bezpečnostní opatření

Při obrábění řeznými nástroji může dojít k vznícení obrovským třením, které může být způsobeno tupým nástrojem, příliš malým posuvem do řezu materiálu, nebo nechá-li se soustružená plocha běžet naprázdno po nástroji. Vyhnout se tomuto problému dá častým broušením, pečlivým udržováním nástrojů a častém odstraňování třísek. Jedním z nejdůležitějších aspektů je také, aby třísky zůstávaly v suchu a skladovaly se v železných nádobách uzavřených víkem. Ve vlhkém prostředí se mohou velice snadno vznítit. Další nebezpečnou věcí při obrábění hořčíkových slitin je také prach a piliny, které při obrábění vznikají, proto je nutné dobré odvětrání těchto prostor.

Hořík se nesmí hasit vodou. K uhašení hořícího hoříku jsou nejlepší volbou vysušené litinové třísky nebo písek, popřípadě práškové hasicí přístroje. Musíme zkrátka zamezit přístupu vzduchu k plamenu.

4 Frézování

Frézování je strojní třískové obrábění převážně rovinných ploch vícebřitým nástrojem. Frézovací nástroj se nazývá fréza a stroj se nazývá frézka. Hlavní pohyb koná nástroj (rotační) a vedlejší pohyb (posuv, přísuv) koná obrobek. Frézování převážně probíhá ve třech osách, ale může probíhat i ve více osách, například v obráběcích centrech. Frézování se dělí na sousledné a nesousledné. Sousledné frézování je, když se nástroj otáčí ve stejném směru pohybu stolu s obrobkem a u nesousledného je tomu naopak, jak je vidět na Obr. 8. [19]



Obr. 8 Obrábění nesousledné, sousledné [20]

4.1 Fréza

Fréza je vícebřítý nástroj používaný k třískovému obrábění kovů, či jiných materiálů. Základní rozdělení fréz je podle jejich způsobu upnutí a to sice na nástrčné Obr. 9 a stopkové Obr. 10, které se dále dělí na stopkové s válcovou, nebo kuželovou stopkou. [19]



Obr. 9 Fréza válcová čelní nástrčná, jemnozubá [21]



Obr. 10 Fréza s jemnozrnného karbidu s válcovou stopkou [22]

4.1.1 Zuby frézy

Zuby jsou na frézu přidělány mnoha způsoby. Jedním z těchto způsobů je vidět na Obr. 11 kdy jsou zuby z jednoho kusu jako tělo frézy. Dalším typem upnutí zubů je vsazování například karbidových destiček do tělesa a ty jsou upnuty například klíny nebo šrouby aj Obr. 12 viz str. 16, tento typ má výhodu v tom, že destičky můžeme zaměňovat za jiné z jiného materiálu popřípadě povlaku a dodává nám tak široké spektrum využití. Posledním typem uchycení je pájení zubů přímo na frézu Obr. 13 viz str. 16. [19]



Obr. 11 Válnová fréza, nástrčná [23]

Zuby jsou na fréze přidělány buď na čele i na obvodu (čelní válková fréza) Obr. 9, viz str. 14, nebo jen na válcovém obvodu (válnová fréza), která je znázorněna na Obr. 11, Nejčastěji, se frézuje na frézce. [19]



Obr. 12 Fréza s karbidovými destičky upnutými šrouby [24]



Obr. 13 Falcovací fréza s připájenými šikmými zuby [25]

4.1.2 Tvorba třísek

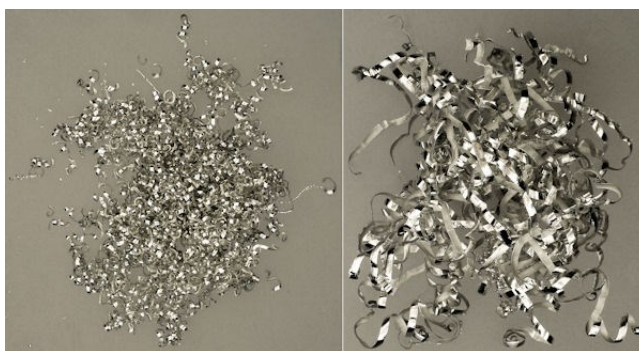
Podle tvoření třísky se dají materiály rozdělit do dvou skupin a to na křehké a houževnaté.

U tvrdých a tvárných materiálů dochází ke tvorbě takzvané článkovité třísky, kdy obrobený materiál odletuje z místa řezu ve formě velice malých elementů, tohoto jevu si můžeme všimnout na Obr. 14.



Obr. 14 Vznik článkovité třísky při obrábění kalené oceli [26]

Naopak u houževnatých materiálů jako je ocel, hořčík dochází ke tvorbě třísky tvářené plynulě, jak je možné si všimnout na Obr. 15. [19]



Obr. 15 Tříska tvářená plynulá, vzniklá obráběním hořčíku [27]

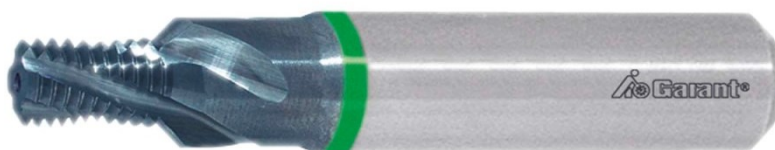
4.2 Frézy vhodné pro obrábění hořčíku

Obrábění odlitků z hořčíkových slitin v porovnání s hliníkem nabízí značnou výhodu. U hořčíkové slitiny se využívá veliké kluznosti a schopnosti hořčíku vést teplo. Obrábění hořčíkových slitin vyžaduje velké úběry materiálu, což může zajistit vysokou kvalitu povrchu.

Pro obrábění hořčíkových slitin můžeme použít nástroje z rychlořezné oceli a destičky ze slinutých karbidů, také můžeme použít keramické destičky, ale ty se používají pouze zřídka. [28] [29]

4.2.1 Frézy z rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou pro své specifické vlastnosti a využitelnosti uváděny jako samostatná skupina legovaných nástrojových ocelí pro vysoce výkonné řezné nástroje. Podle obsahu legujících prvků jsou vhodné pro různé využití obrábění například ocelí, odlitky ocelí vysokých pevností a tvrdostí, tak se můžou použít i na obrábění hořčíkových slitin. Na Obr. 16 je znázorněna fréza s podbroušeným vroubkovaným profilem a díky velkým prostorům pro třísky je tato fréza vhodná pro velký objem úběru, tedy příhodná pro obrábění hořčíkových slitin, ačkoli řezná rychlost je pouze 220 m/min. Ovšem v porovnání s karbidovými destičkami mají rychlořezné oceli stále co dohánět. [28] [29]



Obr. 16 Fréza použitelná pro obrábění slitin hořčíku [30]

4.2.2 Frézy s karbidovými destičkami

Karbidová destička je produktem práškové metalurgie. Z karbidu wolframu, karbidu titanu se vylisuje destička, která je slinována za vysoké teploty, která činí až 1600°C. Karbidová destička se při tomto procesu smršťuje a získává svůj finální tvar. Poté se karbidová destička brousí a povlakována pro jak zvýšení její tepelné odolnosti, tak zvýšení odolnosti proti otěru. [31]

4.2.2.1 Povlakování karbidových destiček

Největší výhodou povlakování je snížení tření, menší ulpívání třísek na čele nástroje, ale také získání tvrdého povrchu za stávající houževnatosti jádra a podstatné prodloužení životnosti samého nástroje. Povlakované slinuté karbidy jsou vyrobeny z pevného karbidového podkladu a kobaltu. Dále je nanесena vrstva termochemicky stabilního povlaku, jako jsou karbidy, nitridy různé oxidy a jejich kombinace. Výsledným povlakováním docílíme vyšších rychlostí, posuvů, větších úběrů třísky a také možnosti přerušovaných řezů. [32]

4.2.2.1.1 První generace povlakování

První generace povlakování (TiC), pouze jednovrstvý povlak, měl velice špatnou soudržnost podkladu a povlaku kde docházelo k odlupování samotné vrstvy a tudíž ke zničení samotného nástroje. Proto se od této metody upustilo. [33]

4.2.2.1.2 Druhá generace povlakování

Druhá generace povlakování (TiCN, TiN), také pouze jednovrstvý povlak, ovšem zdokonalením technologií bylo možno vytvořit vrstvu podkladů o větší tloušťce tentokrát už bez odlupování při funkci nástroje. Povlak TiN se používá při obrábění nízkými reznými rychlostmi a pro obrábění ocelí s nízkou pevností, toto povlakování můžeme vidět na Obr. 17, viz str. 20. Povlak TiCN má již vyšší odolnost vůči otěru, a disponuje velice nízkým koeficientem tření. Tento povlak je vhodný zejména pro frézování ocelí se středním obsahem uhlíku, s nižší až střední pevností. [34]



Obr. 17 Povlakovaná karbidová destička TiN [35]

4.2.2.1.3 Třetí generace povlakování

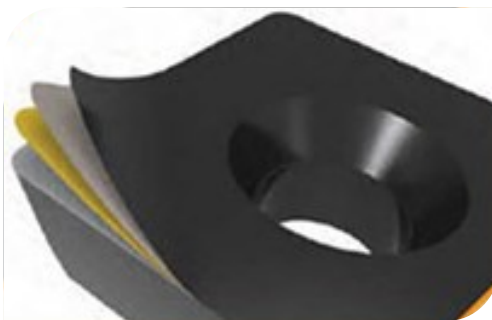
Třetí generace povlakování neboli vícevrstvé povlakování dosahují dvou, tří ale i více vrstev (TiC-TiN, TiC- TiCN- TiN, TiC- Al_2O_3 , TiC- Al_2O_3 - TiN). Přechody mezi jednotlivými vrstvami jsou ostře ohraničeny. Postupné vrstvy jsou nanášeny v určitém pořadí, které odpovídají jejich vlastnostem. První vrstva je nanášena vrstva s lepší přilnavostí většinou (TiC), který má ovšem nižší odolnost proti opotřebení. Jako další jsou nanášeny vrstvy například (Al_2O_3 a TiCN), které mají vysokou tvrdost, lepší odolnost proti opotřebení a oxidaci za vysokých teplot, toto vrstvení můžeme vidět na Obr. 18. Kombinací TiCN a Al_2O_3 slouží jako dobrý podklad pro vysokorychlostní obrábění tvárné litiny. [33]



Obr. 18 Příklad vrstvení povlaků - podkladový slinutý karbid – TiCN – Al_2O_3 - TiN [36]

4.2.2.1.4 Čtvrtá generace povlakování

Čtvrtá generace povlakování takzvané speciální vícevrstvé povlakování. Má většinou deset i více vrstev a mezivrstev. Tyto přechody již neumísí být tak výrazné jako u generace třetí, ale mohou být i výraznější. K původním materiálům pro jednotlivé vrstvy ze 3 generace povlakování, přibývají postupně další nové materiály, jako jsou například (MoS_2 , AlTiN , $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$). Ovšem velice významnou roli, při zvyšování výkonů řezných nástrojů hrají takzvané lubrikační povrchové vrstvy. Mezi představitele této vrstvy patří MoS_2 . Nejdůležitější funkcí lubrikačních vrstev je snížení tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou. Vrstva MoS_2 se nanáší jako poslední vrstva povlaku na tvrdý a otěruvzdorný povrch. Na obrázku Obr. 19 je znázorněné vícevrstvé povlakování a skládání vrstev. [37]



Obr. 19 Karbidová destička s vícevrstvým povlakováním [38]

4.2.2.1.5 Materiály povlaků

Nejdůležitější pro výběr materiálu povlaku je v jakých podmínkách bude destička materiál obrábět. Různé materiály pro povlakování mají i různé vlastnosti. Například na speciální podkladový slinutý karbid je jako první vrstva nanесena TiCN s výrazně vláknitou strukturou, jejíž hlavním úkolem je zvýšení odolnosti břitové destičky proti mechanickému opotřebení. Jako další vrstva, která má výbornou otěruvzdornost za vysokých teplot, tedy při velice vysokých řezných rychlostech, se používá Al_2O_3 . Poslední vrstva TiN snižuje koeficient tření a zvyšuje tak odolnost proti oxidaci.

4.2.2.1.6 Diamantové povlakování vrstvou PVD a CVD

PVD povlakování (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) je převážně charakteristická nízkými pracovními teplotami, tyto teploty jsou pod 600°C. Původně byla tato metoda vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, ovšem v současné době je ve velkém rozsahu používána i u povlakování břitových destiček ze slinutých karbidů, určených pro přerušovaný řez například u frézování. K největším nevýhodám tohoto povlakování patří tenká vrstva povlaku, která činí okolo 5 μm a menší možnosti výběru typu povlaku. [39]

CVD povlakování (Chemical Vapor Deposition) je tvrdší než PVD a jeho odolnost proti opotřebení je dva krát větší. Díky těmto vlastnostem nabízí CVD mnoho výhod při frézování, hrubování a soustružení až po dokončovací operace. Je zejména vhodný pro obrábění slitin hliníku a hořčíku. Hliníku s vysokým podílem křemíku ale i slitin drahých kovů, umělých hmot s abrazivními plnidly, tak i pro obrábění tvrdokovu nebo keramiky. Jelikož je životnost diamantových nástrojů extrémně vysoká je možné dosáhnout vysoké produktivity. Na Obr. 20 je vidět jasný diamantový povlak vzhledem k podkladové destičce. [40]



Obr. 20 Diamantový povlak karbidové destičky [41]

4.2.3 Frézy s keramickými destičkami

Řezná keramika je převážně považována za krystalický materiál, přičemž jeho základní složka je anorganická sloučenina nekovového charakteru. Keramické destičky sice dosahují řezné rychlosti 20 až 30 krát vyšších nežli je tomu u karbidových destiček a proto by byla velice vhodná pro obrábění hořčíku, avšak rychlosti posuvu jsou nízké, ovšem u obrábění hořčíkových slitin potřebujeme velké řezné rychlosti a také velké úběry třísek. Tyto důvody nám proto omezují použití keramických destiček na obrábění hořčíkových slitin. Hlavními výhodami řezné keramiky jsou vysoká tvrdost, odolnost proti mechanickému namáhání, odolnost proti opotřebení, vysoká trvanlivost a řezivost, dostupnost základních surovin, ekologická nezávadnost a poměrně nízká cena. Na Obr. 21 vidíme rozmanité tvary řezné keramiky. [42]



Obr. 21 Břítové destičky řezné keramiky [43]

4.2.4 Monolitní frézy povlakované diamantem

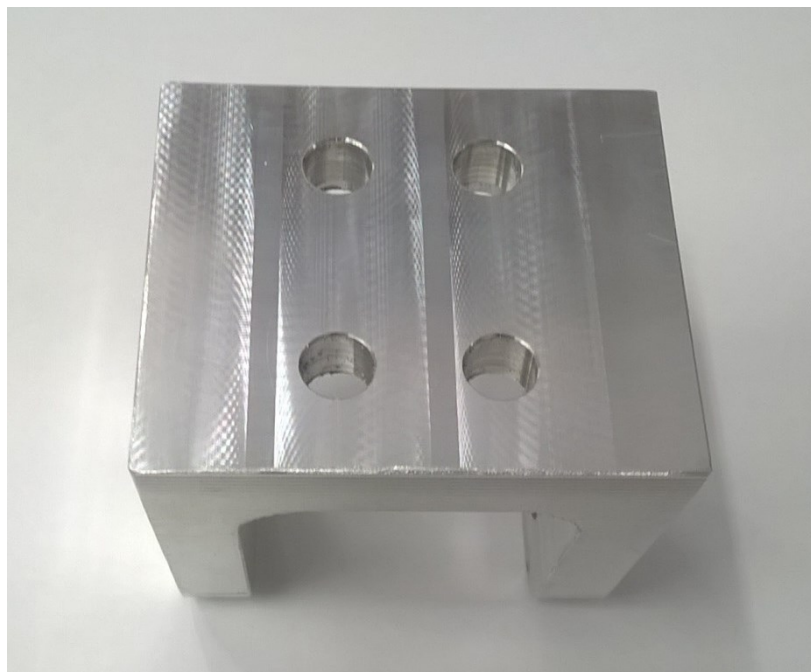
Tento typ fréz je určen zejména pro obrábění grafitu, hliníku a hořčíkových slitin. Mají dobrou trvanlivost břitu při vysokých řezných podmínkách. Základ pro vysokorychlostní obrábění je velmi vysoký stupeň tuhosti nástrojů a přesnost obvodového házení. Na Obr. 22, jsou vidět frézy povlakované metodou CVD, tak jak je vysvětleno v kapitole 4.2.2.1.6. [44]



Obr. 22 Frézy s diamantovými povlaky [45]

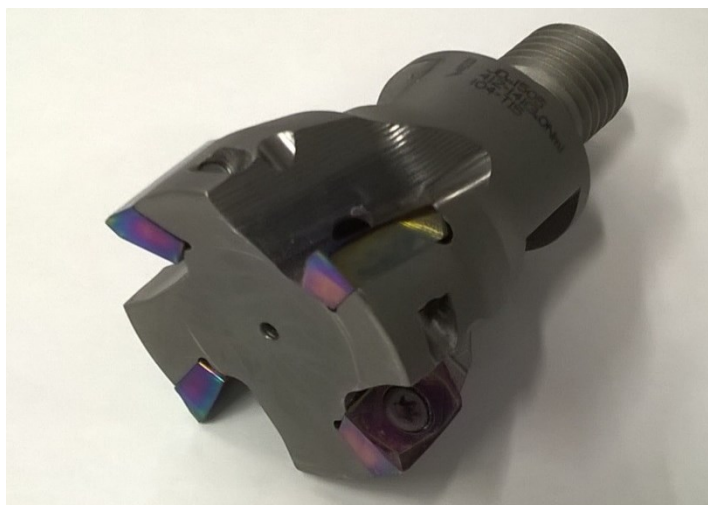
5 Návrh a optimalizace řezných podmínek

Návrh a řezné podmínky byly stanoveny na obráběcí materiál AZ91. Na Obr. 26 je znázorněno oko pro uchycení spodní části tlumiče vyrobené z hliníku. Tuto část bychom obráběli, ovšem nahradili bychom hliníkový materiál, materiálem AZ91, ke kterému byly stanoveny výše uvedené řezné podmínky.

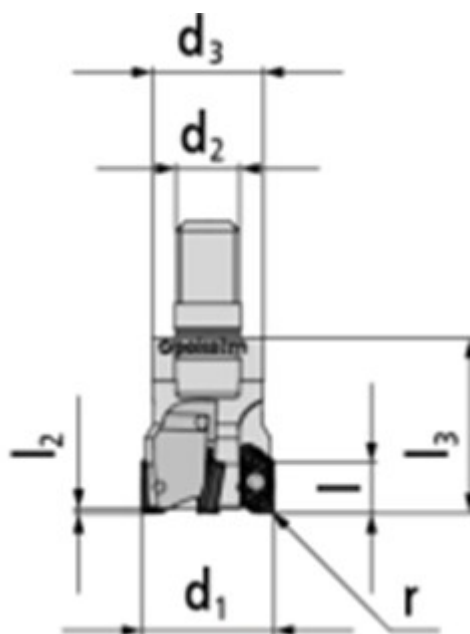


Obr. 26 Obrobek pro obrábění (Spodní oko pro uchycení tlumiče)

Pro Frézování by byla použita fréza Hitachi AHU15.



Obr. 24 Čtyřbřitá fréza s upnutými karbidovými destičkami



Obr. 23 Schéma čtyř břité frézy [46]

V tabulce jsou znázorněny parametry frézy.

Fréza = d_1	32 mm
Připojovací rozměr = d_2	17 mm
Průměr těla frézy = d_3	28,8 mm
Výška VBD = l	14mm
Hloubka utápění = l_2	2,5 mm
Užitná délka = l_3	40 mm

Tab. 2 Popis čtyř břité frézy [46]

Pro frézování zkušebního dílu z hořčíkové slitiny doporučuji použít karbidové destičky JDET150504R-FA SD5010 od firmy Mitshubishi Hitachi tool. Destičky jsou znázorněny na Obr. 24, kde jsou upnuty do čtyř břitě frézy, pomocí šroubů. V tabulce jsou znázorněny parametry destiček.

Výška = l	14 mm
Tloušťka = s	3.58 mm
Rohový rádius = r	0,4

Tab. 3 Parametry destiček

Frézování by probíhalo na víceosém obráběcím centru LU-800 firmy LITZ.



Obr. 25 Víceosé obráběcí centrum LU-800 [47]

Při obrábění by byly nastaveny tyto parametry.

Otáčky vřetene = n	11936 ot/min
Posuv na zub = fz	0,25 mm
Řezná rychlost = Vc	1200 m/min
Velikost posuvu = Vf	11936 mm/min
Velikost úběru materiálu = Q	47 cm ³ /min
Průměrná tloušťka třísky = hm	0,031 mm

Tab. 4 Parametry obrábění

Při obrábění by byla použita chladicí kapalina ECOCOOL 2516 MG. Tato kapalina je vysoce hodnotná vodou mísitelná chladicí, mazací látka se speciálními kvalitativními vlastnostmi a je určena přímo pro obrábění hořčíku. ECOCOOL 2516 MG vytváří s vodou stabilní průsvitnou emulzi s dlouhou životností. Použitím sladěné kombinace vysoce hodnotných ropných rafinátů, emulgátorů, inhibitorů koroze a dalších přísad, bylo docíleno vlastností, jako jsou například vysoká stabilita emulze, vysoká antikorozní ochrana, nízká pěnivost, vysoké mazací účinky, vysoký řezný výkon a další.

Jelikož byla ve stroji kapalina ECOCOOL R – TN 2525 – HP, která je na vodní bázi a není určena pro obrábění hořčíkových slitin a jelikož její vyměnění by potřebovalo více času, stálo by to mnoho peněz a navíc se na stroji právě frézovaly nové díly na automobil, nemohl jsem experiment doposud provést. Experiment bude proveden během letních prázdnin.

6 Závěr

V této práci jsem se zabýval technologiemi obrábění hořčíkových slitin.

V teoretické části jsem popsal hořčík obecně, kde je v jednotlivých kapitolách popsána jeho výroba, vlastnosti, tepelné zpracování a jaké přísadové prvky používáme pro zlepšení jednotlivých vlastností. Dále teoretická část obsahuje popis samotných hořčíkových slitin a nástrojů vhodných pro tento druh obrábění. Jelikož s tímto druhem obrábění jsou spojeny i rizika požáru, jsou zde popsány i bezpečnostní opatření a vhodné chladicí emulze, které jsou nezbytnou nutností pro toto obrábění.

Na závěr byly navrženy optimální řezné podmínky, které byly stanoveny pro víceosé obráběcí centrum LU-800 firmy LITZ. Řezné podmínky jsou stanoveny pro obrábění oka tlumiče, které je v neodpružené části zadní nápravy a chceme tak minimalizovat neodpružené hmoty. Přičemž oko tlumiče je vyrobeno z hliníku a v tomto experimentu by se nahrazoval materiálem AZ91.

Pro obrábění jsem vybral nástroje, které byly dostupné na pracovišti, a stanovil jsem pro tyto nástroje řezné podmínky a vybral příslušnou provozní kapalinu RCOCOOL R-TN 2525-HP, která je za těchto podmínek nezbytnou nutností.

Očekávám, že u tohoto dílu by mohla hmotnost klesnout až o 35%. Experiment se neprovedl, protože na obráběcím stroji právě probíhalo frézování nových dílu pro nový druh automobilu. Také výměna chladicí kapaliny by byla velice finančně náročná, a proto se experiment provede během letních prázdnin.

Použité informační zdroje

1. **Quadrat, Otakar.** *Kovy a slitiny: Abeceda hutnictví kovů a slitin s přehledem jejich využití v praxi. 1. vyd.* Praha : ROH-PRÁCE, 1955.
2. **Janovec, Jiří, Cejp, Jiří a Steidl, Josef.** *Prespektivní materiály. Vyd. 2., .* Praha : vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2341-9.
3. **Thompson, Jeff.** Software, hardware, art. [Online] [Citace: 15. 02 2016.] <http://www.jeffreythompson.org/blog/2012/07/29/magnesium-crystal/>.
4. *Wikipedie, otevřená encyklopedie.* [Online] [Citace: 15. 03 2016.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ho%C5%99%C4%8D%C3%ADk>.
5. **ČECH Jaroslav, JUŘIČKA Ivo , BOUCNÍK Pavel.** POUŽITÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN VE SLÉVÁRENSTVÍ. [Online] [Citace: 10. 04 2016.] http://www.explat.cz/files/pouziti_mg_slitin_ve_slevarenstvi.pdf.
6. **Purohit, R. S. Rana and Rajesh.** EFFECT OF MAGNESIUM ENHANCEMENT ON MECHANICAL PROPERTY AND WEAR BEHAVIOUR OF LM6 ALUMINUM ALLOY. [Online] [Citace: 20. 03 2016.] <http://www.ijser.org/paper/EFFECT-OF-MAGNESIUM-ENHANCEMENT-ON-MECHANICAL-PROPERTY.html>.
7. **Roučka, Jaromír.** *Metalurgie neželezných slitin.* Brno : CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
8. **DRÁPAL, J., KUCHAR, L., TOMAŠEK, K., TROJANOVA, Z.** *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík-příměs.* VŠB Ostrava : autor neznámý, 2004. ISBN 80-248-0579-0.
9. Fázový diagram systému Al-Mg. [Online] [Citace: 16. 02 2016.] <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Al-Mg.php>.
10. **Herman, Aleš.** *Hořčíkové slitiny a jejich vlastnosti: Studie pro VZ .*
11. **Ing. V. Kraus, CSc.** TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ A SLINOVÁN PŘEDNÁŠKY. [Online] [Citace: 10. 03 2016.] <http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf>.

12. **Jareš, Vojtěch.** *Lehké kovy*. Praha : Česká matice technická, 1940.
13. **Kašparová, Ing. Eliška.** MM průmyslové spectrum. *Jediná slévárna hořčíkových slitin v ČR*. [Online] [Citace: 7. 03 2016.] <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/jedina-slevarna-horcikovych-slitin-v-cr.html>.
14. **AVEDESIAN, M. M. a BAKER, H.** *Magnesium and Magnesium Alloys*. Materials Park OH : ASM International, 1999. ISBN 0-87171-657-1.
15. nc-net.or.jp. *obrábění v 5 osách, úhlová hlava obrábění, AZ31*. [Online] [Citace: 15. 03 2016.] <http://www.nc-net.or.jp/company/46279/product/detail/1735/>.
16. MM spektrum. [Online] [Citace: 25. 02 2016.] http://www.mmspektrum.com/content/image/gallery/0005_2015_113_1430146678/haas_obr_02b.jpg.
17. **Ing. Aleš Herman, Ph.D., Ing. Barbora Stunová.** MM Průmyslové spektrum. [Online] 2016. [Citace: 12. 3 2016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyhody-pouziti-mg-slitin-v-porovnani-s-ostatnimi-konstrukcnimi-materialy-2.html>.
18. **Kainer, K. U.** *Magnesium alloys and technologies*. Weinheim: WILEYVCH VerlagGmbH& Co. KG aA : autor neznámý, 2003. ISBN 3-527-30578.
19. **Vaňák, Mgr. Antonín.** Technologie frézování pracovní listy. [Online] [Citace: 15. 03 2016.] http://www.ssztz.cz/stary_web/stary_web/esf/TEC_fr.pdf.
20. Wikipedie. *Frézování*. [Online] 19. 02 2016. [Citace: 1. 03 2016.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD>.
21. bo-import Nářadí a nástroje. *Fréza válcová čelní nástrčná*. [Online] [Citace: 3. 02 2016.] <http://www.bo-import.cz/frezy-hss/frezy-nastrcne-hss/freza-valcova-celni-nastrcna-jemnozuba-690275v-030030-30x30-hss-co5-typ-h-16079.html>.
22. profinastroje.cz. *Frézy z jemnozrnného karbidu s válcovou stopkou*. [Online] [Citace: 10. 02 2016.] <http://profinastroje.cz/rezne-nastroje-do-kovu/37972-frezy-z-jemnozrnného-karbidu-s-valcovou-stopkou-4-brity-20mm-4fl-standard-carbide-end-mill-shr1616040k.html>.

23. nastrojenaradi.cz. *Fréza válcová 50x80 nástrčná*. [Online] [Citace: 15. 02 2016.] <http://www.nastrojenaradi.cz/freza-valcova-50x80-nastrena>.
24. Techmagazin. *Inovace řezných nástrojů jako předpoklad zvýšení produktivity výroby*. [Online] [Citace: 20. 02 2016.] <http://www.techmagazin.cz/535>.
25. Nastrojebrno.cz. *Fréza na dřevo falcovací*. [Online] [Citace: 16. 02 2016.] <http://www.nastrojebrno.cz/index.php/fr%C3%A9za-na-d%C5%99evo-falcovac%C3%AD-10-detail?tmpl=component&print=1>.
26. Taegutec.cz. *Focus products*. [Online] [Citace: 3. 02 2016.] http://www.taegutec.cz/download/katalogy/brozura_Focus_CZ_2014-10.pdf.
27. Robotroom. *Metal Dust, Chips, and Turnings from Machining*. [Online] [Citace: 5. 01 2016.] <http://www.robotroom.com/Elemental-Cylinders-3.html>.
28. **KOCMAN, Karel**. *Technologické procesy obrábění*. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2011. Sv. první. ISBN 978-80-7204-722-2..
29. **KOCMAN, karel a Jaroslav PROKOP**. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ*. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o Brno, 2001. str. 270. ISBN 80-241-1996-2.
30. Hoffmann-group. *Stopková závitová fréza TiAlN 1/8-27 GARANT*. [Online] [Citace: 18. 01 2016.] <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/Mono-obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/Z%C3%A1vitn%C3%ADky/Stopkov%C3%A1-z%C3%A1vitov%C3%A1-fr%C3%A9za-TiAlN-1-8-27-GARANT/p/139730>.
31. Superhard.cz. *Karbidové destičky*. [Online] [Citace: 3. 04 2016.] <http://www.superhard.cz/produkty/karbidove-desticky>.
32. Superhard.cz. *Speciální nástroje pro obrábění*. [Online] [Citace: 3. 03 2016.] <http://www.superhard.cz/produkty/karbidove-desticky>.
33. MM Průmyslové spektrum. *Trendy v povlakování slinutých karbidů*. [Online] [Citace: 5. 03 2016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>.

34. zps-fn. *Povlaky používané ke zvýšení životnosti a produktivity fréz.* [Online] [Citace: 5. 03 2016.] <http://www.zps-fn.cz/povlaky-pouzivane-ke-zvyseni-zivotnosti-a-produktivity-frez/>.
35. Arceurotrade.co.uk. *CCMT 80° Rhombic TiN Coated Carbide Inserts.* [Online] [Citace: 20. 03 2016.] <http://www.arceurotrade.co.uk/Catalogue/Cutting-Tools/Lathe-Turning-Tools-Indexable/ARC-Indexable-Turning-Tools/CCMT-80-Rhombic-TiN-Coated-Carbide-Inserts>.
36. Ateam.zcu.cz. *Nové trendy vývoje tených vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje .* [Online] [Citace: 25. 01 2016.] http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf.
37. **Humár, A.** *Materiály pro řezné nástroje. 1 vyd. .* Praha : MM Publishing, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
38. kennametal. *Milling Insert Grade Descriptions.* [Online] [Citace: 16. 02 2016.] <https://www.kennametal.com/en/products/20478624/stellram-cutting-tools/stellram-indexable-milling/milling-insert-grades.html>.
39. PVD Otěruvzdorné vrstvy. *PVD otěruvzdorné vrstvy.* [Online] [Citace: 1. 04 2016.] <http://www.pvd.cz/>.
40. **Dvořák, Luděk.** MM průmyslové spektrum. *Diamantové nástroje se silnou vrstvou CVD.* [Online] [Citace: 1. 04 2016.] <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/nove-frezy-z-veletrhu-emo.html>.
41. Hoffmann-group. *APET 133504 FR diamantový povlak HB 7810 ALU GARANT.* [Online] [Citace: 6. 01 2016.] <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/Modul%C3%A1rn%C3%AD-objekt%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/Fr%C3%A9zy-s-vym%C4%9Bniteln%C3%BDmi-desti%C4%8Dkami-GARANT/APET-133504-FR-diamantov%C3%BD-povlak-HB-7810-ALU-GARANT/p/215308> .
42. MM Průmyslové spektrum. *Řezná keramika a kubický nitrid boru.* [Online] [Citace: 3. 03 2016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezna-keramika-a-kubicky-nitrid-boru.html>.

43. CeramTec. *Silicon Nitride Ceramics for Machining Applications*. [Online] [Citace: 20. 03 2016.] <https://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/silicon-nitride-ceramics/>.
44. MM průmyslové spektrum . *Monolitní frézy povlakované diamantem*. [Online] [Citace: 6. 03 2016.] <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/nastroje-pro-zavitovani-a-frezovani-tezkoobrobitelných-materialu.html>.
45. Eluc.Kr-olomousky.cz. [Online] [Citace: 5. 01 2016.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1429>.
46. Krebs. 4 32 267 R+ Slotworx®. [Online] [Citace: 1. 04 2016.] <http://3dok.de/kwtshop/slotworx/3207-4-32-267-r-slotworx-einschraubfr%C3%A4ser-%C3%B8-32-slotworx.html>.
47. twitter.com. *DTS ProDesign LU-800 5 axis machine has arrived. Contact for more details*. [Online] [Citace: 12. 04 2016.] <https://twitter.com/dtsukltd/status/476341084457820161>.